

低材質フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手の限界状態

A STUDY ON LIMIT STATES OF HSFG BOLTED JOINTS
USING LOWER GRADE FILLER PLATE

亀井義典*, 池端文哉**, 西村宣男***

Yoshinori KAMEI, Bunya IKEHATA, Nobuo NISHIMURA

* 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

** 大阪大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

*** 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

This paper deals the elasto-plastic finite element analysis of the HSFG bolted joints with the lower grade filler plate which is inserted into the frictional area between the flange plate and the splice plate. The main analytical parameters of the joints are the thickness and the steel grade of the filler plate. The slip strength, the declination of the preloaded tensile load of the high strength bolts, the stress condition, the effect of the frictional force of the joint with filler plate and so on are discussed about the results. And then the relationship between the slip strength of the joint and the thickness and steel grade of the filler plate are investigated.

Keywords : HSFG bolted joints, filler plate, FEM, slip strength, limit state

1. はじめに

平成7年10月に、建設省から発表された鋼道路橋設計ガイドライン(案)¹⁾では、鋼桁の製作における省力化のために、主桁ブロックを一定断面とし、現場継手部で母材と同質以上のフィラープレートを使用することにより断面変化させることを原則としている。ところが、断面変化の程度によっては、フィラープレートの板厚が薄くなり、母材が高強度鋼の場合は母材と同材質の薄板の入手が困難なこともあり、フィラープレートとして入手しやすい普通鋼の使用に対する要望が製作会社から寄せられている。

高力ボルト摩擦接合は、応力の流れが円滑で継手の剛性が高く疲労に強い優れた現場接合であることが広く知られている²⁾。しかし、母材や添接板の材質とフィラープレートの材質が大きく異なる場合、フィラープレートの早期の降伏によりボルトの軸力抜けが促進され、継手のすべり強度が低下する恐れや、断面変化の度合いによっては、フィラープレートと母材の板厚の構成比の変化が継手部の局部応力に悪影響を与えることが懸念される。

しかしながら、ボルト継手部におけるフィラープレートが軸力伝達機能に与える影響に対する系統的な評価は、実験的にも解析的にも報告されていないのが現状である。そこで、フィラープレートを有する高力ボルト摩擦接合引張継手の強度およびフィラープレートが継手部に与える影響を明らかにするため、フィラープレートの板厚(母材の断面変化率)および母材、添接板に対するフィラープレートの材質をパラメータとして、ボルト継手を対象に開発した弾塑性有限要素法を用いて数値解析を行い、荷重-変位関係、ボルト軸力抜け、応力状態について考察した。また、母材、添接板およびフィラープレートの相互作用、すべりおよび降伏限界状態に関して検討した。

2. 解析手法と解析モデル

2.1 解析プログラム

摩擦接合継手のボルト孔、ボルト頭部および座金などの複雑な形状をモデル化するため、要素は20節点アイソパラメトリック立体要素を用い、材料は等方等質性の完全弾塑性体とする。解析プログラムは、初期ボルト軸力を導入した後、継手に作用する引張力の増加に伴うボルトの軸力抜けが考慮できるようになっている。また、鋼板の接触面には節点バネ型のジョイント要素を導入し、接触面における力学状態に応じて剛性を変化させることにより、すべり現象を表現することが可能となっている。解析プログラムの機能性および実際の現象との整合性は既往の研究により確認されている^{3), 4)}。ボルト配置片側2行1列の2面せん断継手において、解析誤差は母材降伏強度の実験値に対し2.0%以下、主すべり発生強度の実験値に対し0.5%以下に収まった。ボルト軸力に関しても、母材降伏時および主すべり発生時における減少量は、実験値に対し誤差2.0%以内となり解析値として十分信頼できる値を得た。

図-1にジョイント要素の概要、図-2にジョイント要素の剛性評価に対するフローチャートを示す。ジョイント要素は、接触面において2方向のせん断と板厚方向に3自由度の相対変位を有する。各変位自由度に対応する作用力 F_x, F_y, F_z は、ジョイント要素が結合するアイソパラメトリック要素の積分点における板厚方向応力および2方向せん断応力から算出され、接触面の力学状態の判定に用いる。

まず、接触面における剥離状態に対する判定を行う。鋼板が支圧しあう状態を接触状態とすれば、剥離状態に対する判定式は以下のようになる。

$$F_z < 0.0 \quad (2.1)$$

ジョイント要素の力学状態が上式を満たさない場合は剥離状態を表し、満たす場合は接触状態を表す。剥離状態の場合、接触面での力の伝達は生じないため、ジョイント要素の各自由度に対する剛性は零とし次式で定義する。

$$\begin{cases} k_x = 0.0 \\ k_y = 0.0 \\ k_z = 0.0 \end{cases} \quad (2.2)$$

また、接触面における板厚方向の変位の不適合に対しては、座標に矛盾が生じないように各収束計算の過程で確認している。

母材と添接板が接触状態にある場合、接触面の状態としては、母材と添接板にせん断方向の変位差が生じるすべり状態と生じない固着状態が考えられる。これらに対する判定式は次のようになる。

$$\begin{cases} \lambda \bullet F_z < F_x \\ \lambda \bullet F_z < F_y \end{cases} \quad (2.3)$$

ここに、 λ は摩擦係数である。摩擦係数はすべりの判定にのみ用い計算上は関与しない。上式のいずれかを満たす場合をすべり状態、双方ともに満たさない場合を固着状態とする。接触面が固着状態にある場合、ジョイント要素の各自由度に対する剛性は、 F_z の増分および摩擦領域における F_z の分布を重みとして与え、次式で定義する。

$$\begin{cases} k_x = k'_x \bullet (F_z / \bar{F}_z) \bullet (F_z / F_{z,1}) \\ k_y = k'_y \bullet (F_z / \bar{F}_z) \bullet (F_z / F_{z,1}) \\ k_z = k'_z \bullet (F_z / \bar{F}_z) \bullet (F_z / F_{z,1}) \end{cases} \quad (2.4)$$

ここに $\bar{F}_z$ は摩擦領域におけるジョイント要素の作用力 F_z の平均値、 $F_{z,1}$ は初期ボルト軸力導入直後の F_z 、 k'_x, k'_y, k'_z はジョイント要素の初期剛性である。 k'_x, k'_y の値としては、母材および添接板と同等の剛性として弾性係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ を与え、 k'_z は無限度と同等の値とした。

接触面がすべり状態の場合、せん断2方向の剛性は、固着状態より低減した値 ν_x, ν_y とし次式で定義する。

$$\begin{cases} k_x = \nu_x \\ k_y = \nu_y \\ k_z = k'_z \bullet (F_z / \bar{F}_z) \bullet (F_z / F_{z,1}) \end{cases} \quad (2.5)$$

本解析では ν_x, ν_y の値として基本摩擦係数0.5を採用した。基本摩擦係数は、本研究室で行われた継手の摩擦接合引張試験結果のうち、主すべりが発生した継手のすべり係数の平均値として0.5を得⁵⁾、これを参考にして設定した。

2.2 解析モデル

図-3に解析モデルの概要を示す。I型断面主桁の高力ボルト摩擦接合継手部における全体のすべり現象は、フ

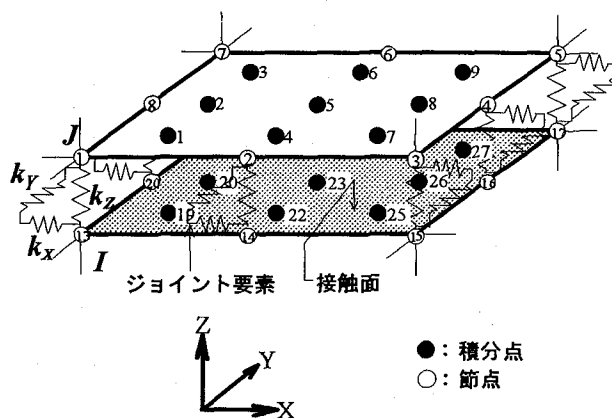


図-1 ジョイント要素の概要

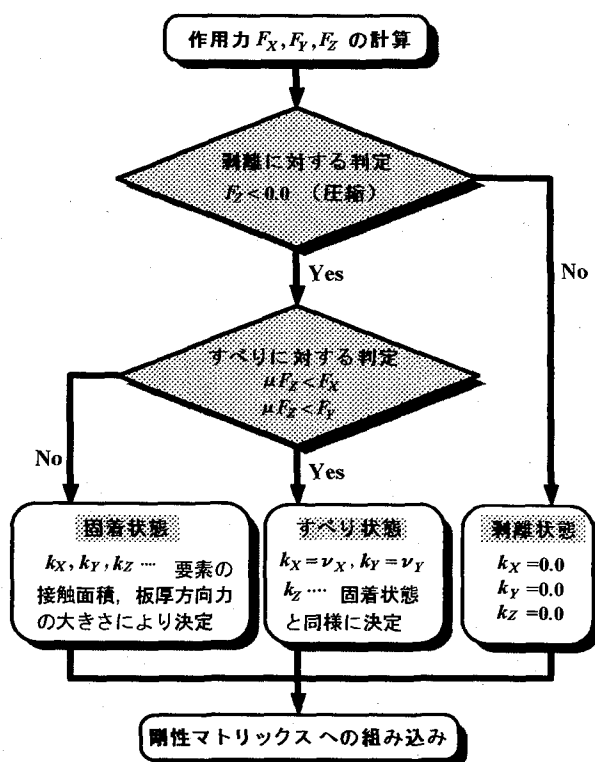
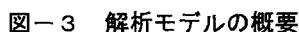
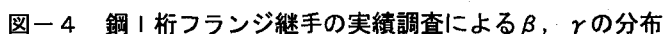


図-2 ジョイント要素の剛性評価

ランジおよびウェブの添接ボルト群の相互作用を無視しては評価できないが、引張フランジ部の主すべりおよび母材の降伏とそれに伴う部分すべり現象は引張を受ける単一の摩擦接合継手と挙動的に一致しているとみなすことができる。したがって、本解析では桁フランジの高力ボルト摩擦接合継手部を単一の摩擦接合引張継手として仮定する。また、引張継手の各種限界状態は、母材の降伏強度とすべり強度との相互関係により決まることが著者らの既往の研究で明らかとなっており、降伏やすべりに対する局所的なメカニズムにはボルトの行列数の影響は少ない⁵⁾。そのため、解析モデルとしては極力簡易なモデルを考え、高力ボルト(F10T, M20)片側1行2列の2面せん断継手で統一した。継手部における断面変化につ



パラメータ \ モデル		A (厚部)	A2 (薄部)	A4 (薄部)	A6 (薄部)	B (厚部)	B2 (薄部)	B4 (薄部)	B6 (薄部)	C6 (薄部)
母材	鋼種	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM570	SM570	SM570	SM570	SM570
	降伏応力 σ_y (kgf/cm ²)	3600	3600	3600	3600	4600	4600	4600	4600	4600
	板厚 t_r (mm)	15.00	13.00	11.00	9.00	15.00	13.00	11.00	9.00	9.00
	全幅 w (mm)	70.00	70.00	70.00	70.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
	ボルト孔径 (mm)	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50
	純断面積 A_n (cm ²)	7.13	6.18	5.23	4.28	5.58	4.83	4.09	3.35	3.35
添接板	鋼種	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM570	SM570	SM570	SM570	SM570
	板厚 (上) (mm)	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
	板厚 (下) (mm)	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
フィラー プレート	鋼種	SS400	SS400	SS400	SS400	SS400	SS400	SS400	SS400	SM570
	降伏応力 σ_y (kgf/cm ²)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	4600
	板厚 t_2 (mm)	****	2.00	4.00	6.00	****	2.00	4.00	6.00	6.00
断面変化率) $t_2/(t_1+t_2)$ (%)		0.0	13.3	26.7	40.0	0.0	13.3	26.7	40.0	40.0
初期導入ボルト軸力 (tf)		18.15	18.15	18.15	18.15	18.15	18.15	18.15	18.15	18.15
すべり強度(すべり係数=0.4) N_{SL} (tf)		29.04	29.04	29.04	29.04	29.04	29.04	29.04	29.04	29.04
母材純断面降伏強度 N_{FYn} (tf)		25.65	22.23	18.81	15.39	25.65	22.23	18.81	15.39	15.39
添接板純断面降伏強度 N_{SYn} (tf)		30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78
$\beta = N_{SL}/N_{FYn}$		1.13	1.31	1.54	1.89	1.13	1.31	1.54	1.89	1.89
$\gamma = N_{SYn}/N_{FYn}$		1.20	1.38	1.64	2.00	1.20	1.38	1.64	2.00	2.00



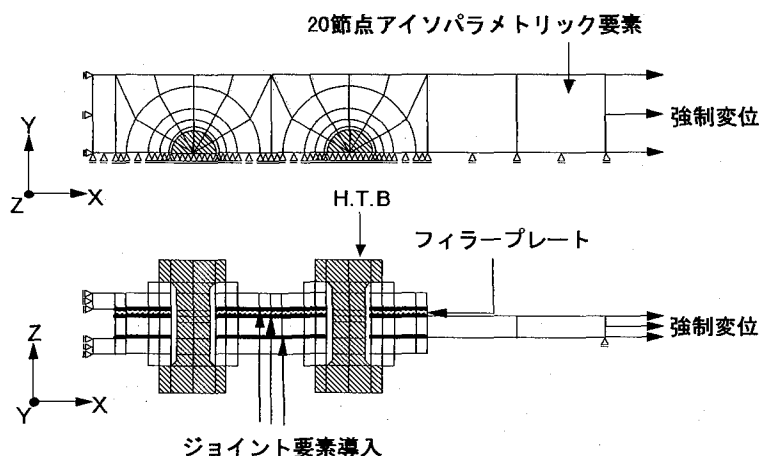


図-5 要素分割図

いては、母材上面にフィラープレートを用いて母材の板厚をそろえ、継手の長手方向にフィラープレートが挿入される側を薄部、挿入されない側を厚部とする。各モデルで、厚部の母材板厚は 15mm、添接板厚はボルト頭部側およびナット側共に 9mm とし、継手の幅、フィラープレートの板厚および母材、添接板、フィラープレートの材質を変化させた。また、厚部の母材板厚に対する薄部の母材板厚の減少量を継手の断面変化率とする。

表-1 に解析モデルの諸元を示す。初期導入ボルト軸力は道路橋示方書⁶⁾に基づき、設計値 16.5(tf)の1割り増し 18.15(tf)を導入する。同様にすべり係数を 0.4 とし設計した結果、公称すべり強度は 29.04(tf)となる。

高力ボルト摩擦接合継手の限界状態はすべり強度と母材降伏強度の比により大きく作用される^{5),7),8)}。また、添接板と母材降伏強度比は継手の初期剛性に大きく影響を与えることが考えられる⁹⁾。そこで、解析モデルに対するパラメータとして、すべり強度・母材降伏強度比 β および添接板・母材降伏強度比 γ を用いる。

$$\begin{cases} \beta = N_{SL} / N_{Ftn} \\ \gamma = N_{SYn} / N_{Ftn} \end{cases} \quad (2.6)$$

ここに、 N_{SL} は公称のすべり強度、 N_{Ftn} は公称の母材純断面降伏強度、 N_{SYn} は公称の添接板純断面降伏強度である。 β および γ の値は、鋼 I 桁フランジ継手の実績調査の分布⁴⁾ (図-4) より算出し、標準的な値として、厚部側で β を 1.13、 γ を 1.20 で統一した。薄部側はフィラープレートの材質および板厚を変化させた各モデルに対し、解析パラメータ β および γ の値を設定した。

フィラープレートの母材および添接板に対する材質を検討するため、A シリーズは母材および添接板の鋼種は SM490Y、フィラープレートの鋼種は SS400、同様に B シリーズは、それぞれ SM570、SS400 とした。C6 はフィラープレートの材質比較のためのモデルで母材、フィラープレート共に SM570 とする。また、フィラープレートの板厚の違いによる影響を検討するため、A および B シリーズに対しては、薄部でフィラープレートの板厚を 2, 4, 6mm と変化させたモデルを考え、フィラープレートの板厚を添え字として A2, A4, A6 および B2, B4, B6 の記号で表す。この場合、薄部の厚部に対する、母材の断面変化率はフィラープレートが 2, 4, 6mm の各モデルで、それ

ぞれ 13.4, 26.7, 40.0% となる。また β および γ の値はそれぞれ 1.31, 1.54, 1.89 および 1.38, 1.64, 2.00 となる。

2.3 有限要素分割および境界条件

図-5 に要素分割図を示す。ボルト頭部、座金等の適切な分割形状および分割数については、本解析モデルで使用した母材に相当する孔空き鋼板による検討を行い、応力状態、応力集中係数など所定の値 (誤差 0.5% 以内) を得る十分な分割として決定した。鋼板の接触面にはジョイント要素を用いるが、本モデルでは母材とフィラープレート、フィラープレートと添接板、添接板と座金の全接触面にジョイント要素を導入する。継手の対称性を利用し、継手全体の 1/4 モデルを解析対象とする。外力としては継手長手方向に軸引張が生ずるように、継手端部に強制変位を与える。

3. 解析結果と考察

表-2 に初期ボルト軸力導入によるフィラープレートの板厚方向応力の最大値 $\sigma_{z,max}$ (kgf/cm²) を示す。初期ボルト軸力導入により、フィラープレートが SS400 の A シリーズ、B シリーズでは、降伏応力の 8 割以上の応力が、ボルト孔周辺で局部的に発生するが、降伏に達することはない。 $\sigma_{z,max}$ は A2, A4, A6 および B2, B4, B6 と断面変化率が増すほど減少する傾向にある。フィラープレートが SM570 の C6 では、 $\sigma_{z,max}$ は降伏応力の 5 割にも達していない。

図-6 に荷重-全伸び関係を示す。図-6 (a) は A シリーズ、(b) は B シリーズ、(c) はフィラープレート厚が

表-2 ボルト軸力導入に伴うフィラープレートの応力

モデル	A2	A4	A6	
$\sigma_{z,max}$ (kgf/cm ²)	2120	2092	1872	
σ_y (kgf/cm ²)	2400	2400	2400	
$\sigma_{z,max}/\sigma_y$ (%)	88.3	87.2	78.0	
モデル	B2	B4	B6	C6
$\sigma_{z,max}$ (kgf/cm ²)	2105	1995	1935	1925
σ_y (kgf/cm ²)	2400	2400	2400	4600
$\sigma_{z,max}/\sigma_y$ (%)	87.7	83.1	80.6	41.8

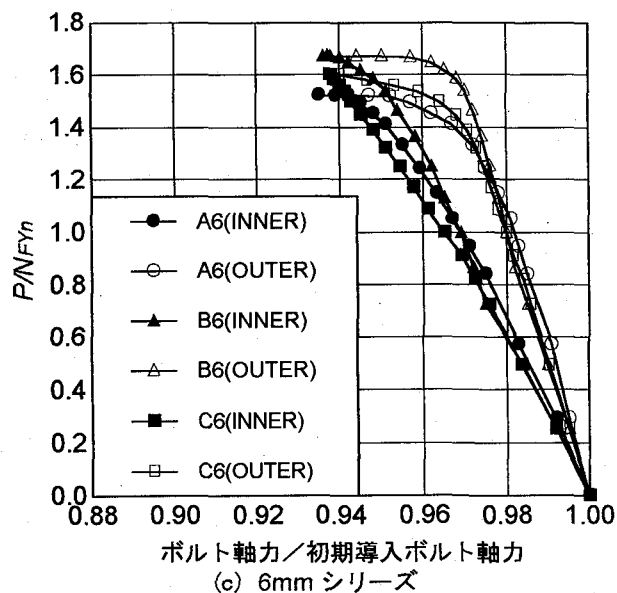
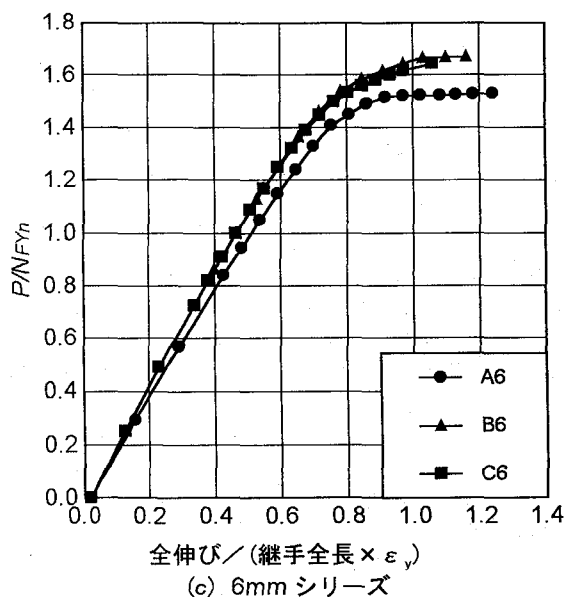
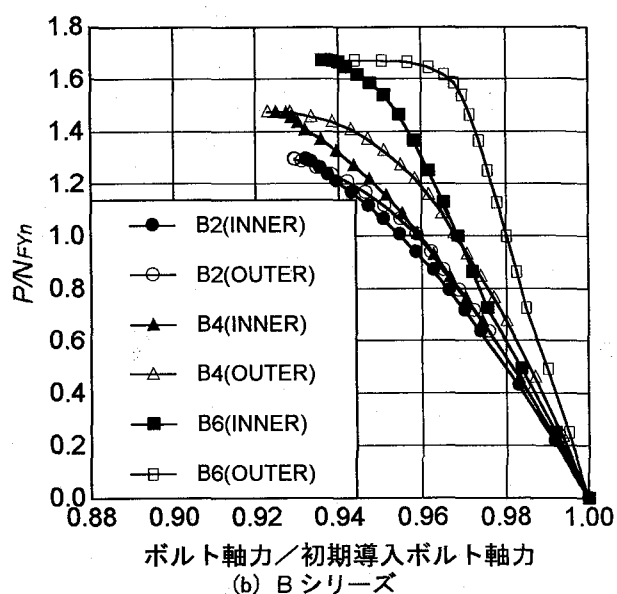
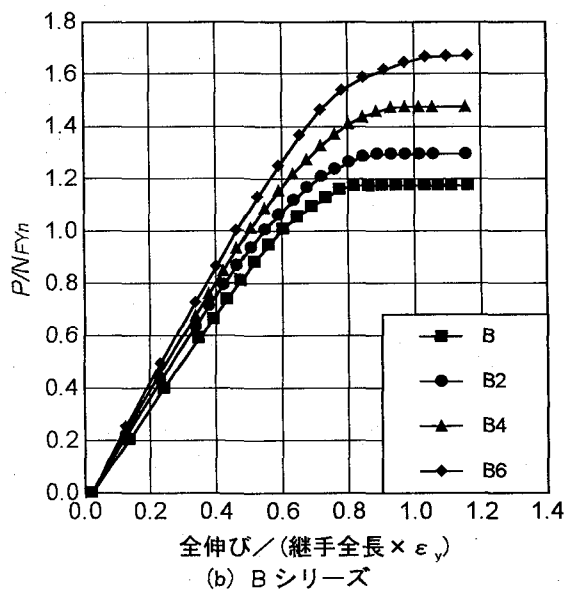
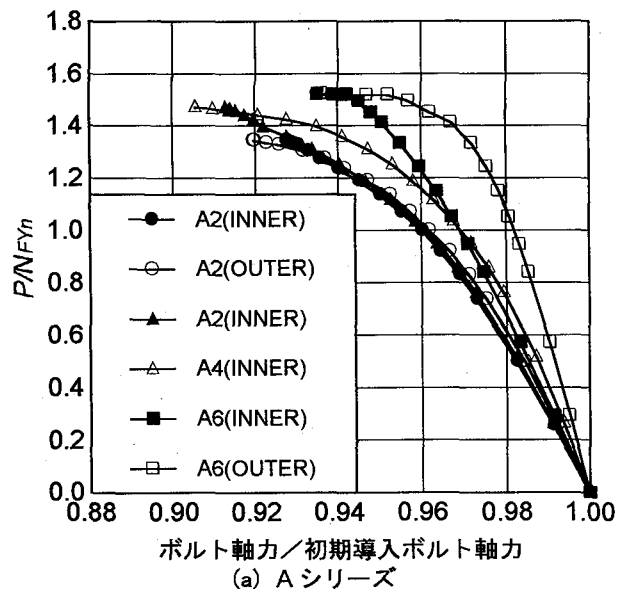
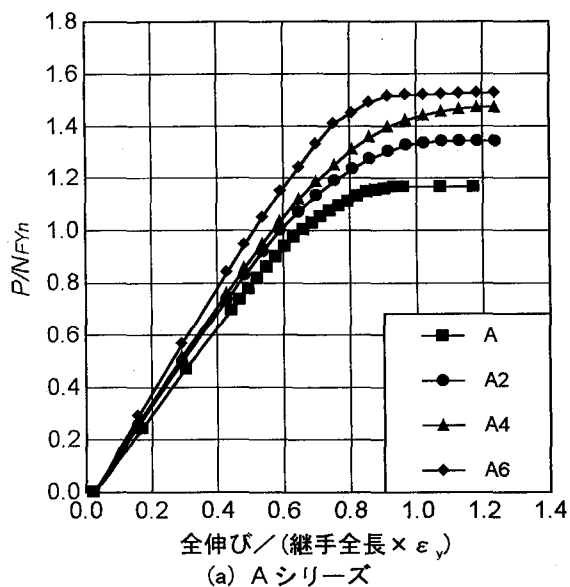


図-6 荷重-全伸び

図-7 荷重-ボルト軸力

6mm の A6, B6, C6 に対する荷重-全伸び関係である。図の縦軸は載荷荷重 P を母材純断面降伏強度 N_{Fm} で無次元化した値 P/N_{Fm} 、図の横軸は全伸びを継手全長と母材の降伏ひずみの積で無次元化した値を表す。主すべり発生型の継手 A, A2, A4, B, B2 および B4 に対しては主すべり発生時の荷重 P_{SL} を、母材降伏先行型の継手 A6, B6, C6 に対しては、全断面降伏時の荷重 P_{Fm} を強度限界と定義する。後者では主すべりが発生する以前に母材がボルト孔周辺で全断面塑性化に達し、それ以降の強度は期待できないため、全断面降伏時の荷重 P_{Fm} を強度限界として評価した。全てのモデルにおいて、各モデルに対応した強度限界、 P_{SL} または P_{Fm} までは図示している。

図-6 (a) では、A, A2, A4 および A6 のピーク値はそれぞれ 1.17, 1.34, 1.48, 1.52 となる。A2, A4, A6 と断面変化率が大きくなるほど、強度限界 (P_{SL} または P_{Fm}) は薄部の母材の降伏強度 N_{Fm} に比べて大きくなる。 $\beta (=N_{SL}/N_{Fm})$ 値が 1.89 と大きい A6 では、母材降伏先行型の典型的な継手である。そのため、それぞれの限界荷重 P_{Fm} は、公称すべり強度 N_{SL} を 1 割以上下回る値となる。図-6 (b) における B シリーズでも A シリーズと同様の傾向を示し、B, B2, B4, B6 それぞれのピーク値は 1.17, 1.30, 1.48, 1.67 となる。B6 では A6 同様に母材降伏先行型の継手となるため強度限界 P_{Fm} は N_{SL} を 1 割以上下回る。また、フィラープレート厚 6mm のモデルを比較した図-6 (c) の A6, B6, C6 では、それぞれのピーク値は 1.52, 1.67, 1.65 となる。これらのモデルでは β 値が 1.89 と大きく、母材降伏先行型の典型的な継手となり、挙動特性は類似する。B6, C6 を比較すると初期剛性およびピーク値共にほぼ等しい値を呈しており、フィラープレート厚 6mm のモデルでは低材質のフィラープレートの使用が十分可能であると考えられる。

図-7 に荷重-ボルト軸力関係を示す。図-7 (a) は A シリーズ、(b) は B シリーズ、(c) はフィラープレートが 6mm の A6, B6, C6 に対する荷重-ボルト軸力関係である。図の縦軸は荷重レベル P/N_{Fm} 、図の横軸はボルト軸力を初期導入ボルト軸力で無次元化した値を示す。ボルト軸力の減少は、継手を構成する鋼板の応力および変形状態に依存する。鋼板が弾性状態の間はボルト軸力の低下は鋼板のポアソン効果による形状変形に依存し緩やかな減少を示すが、鋼板が塑性化するとボルト軸力は急激に減少する。また、継手端部での引張力は、内側ボルト列では主に添接板に、外側ボルト列では主に母材に伝達されるため、ボルト軸力の減少は、内側ボルト列では添接板の形状変形に、外側ボルト列では母材の形状変形に依存する。

図-7 (a) の A シリーズでは、それぞれ断面変化率に応じて特徴的なボルト軸力低下の傾向を示す。A2 では内側ボルト列と外側ボルト列で同程度のボルト軸力低下を示す。これは他のモデルに比べ、添接板・母材降伏強度比 $\gamma (=N_{SL}/N_{Fm})$ が 1.38 と 1 に近いことによる。A4, A6 と断面変化率が大きくなるに従い、 γ 値と共に添接板と母材の板厚差は大きくなり、内側ボルト列と外側ボルト列で軸力低下に差が生じる。A6 では鋼板の変形が弾性範囲の荷重レベルではポアソン効果の影響で、母材に比べ板厚の大きい添接板の板厚減少が大きく、内側列でのボルト軸力低下が大きい。しかし P/N_{Fm} が 1.0 以降の荷重では γ 値が 2.00 と大きいため、母材の外側列における塑性化が先行し、外側列のボルト軸力低下が著しい。図-7 (b)

の B シリーズでも同様の結果となり、B2, B4, B6 と γ が大きくなるに従い、内側列と外側列におけるボルト軸力低下に差が生じる。また、図-7 (c) の A6, B6, C6 では、 β 値、 γ 値が 1.89, 2.00 と共に大きいため、継手の形状変形は母材の外側列における塑性化に大きく依存する。そのため、ボルト軸力低下もフィラープレートの材質に依らず同様の低下傾向を示す。

全モデルを通じて、 β 値、 γ 値およびフィラープレートの板厚、材質によりボルト軸力の低下傾向は異なるものの、主すべり発生時および母材降伏時におけるボルト軸力の低下は 10.0% 以内であり、各モデルの強度限界 P_{SL} または P_{Fm} において著しい低下は生じていない。

図-8 においては B シリーズ各モデルの強度限界 P_{SL} または P_{Fm} における応力分布を示す。応力は相当応力を各部材の降伏応力で無次元化した値で表し、黒塗りの部分が降伏領域である。図は上より、ボルト頭部側の添接板 (以下、添接板(上))、フィラープレート、母材、ナット側の添接板 (以下、添接板(下)) である。B2, B4, B6 と断面変化率が大きくなるに従い、フィラープレートの降伏領域は減少し、逆に母材の降伏領域は増加する。特に B6 では母材の外側列のボルト孔周辺で全断面塑性化に至っており、母材降伏先行型継手の特徴がよく現れている。また、添接板に着目すると添接板(上)に比べ添接板(下)に降伏領域が目立つ。これは、母材を挟み上側では添接板およびフィラープレートの剛性が期待できるのに対し、下側では添接板のみの剛性しか期待できないためである。A シリーズの各モデルでも同様の傾向が確認された。

図-9 および図-10 では、B シリーズの強度限界における接触面の相対変位および接触状況を示す。図は、上より添接板(上)-フィラープレート、フィラープレート-母材、母材-添接板(下)間の相対変位および接触状況を表している。

B2 では、母材-フィラープレート間の接触面で固着領域が確認され、この間では相対的に変位が生じていないため、主すべりは添接板(下)-母材、およびフィラープレート-添接板(上)間で発生することが分かる。したがって、フィラープレートは主すべり発生モデルの B2 において、母材と共に有効に機能しているといえる。母材-フィラープレート間で確認される固着領域に着目すると、 γ が 1 に近いこともあり、応力状態と同様に内側及び外側ボルト孔周辺で同様の様相を示す。A シリーズの A2 でも同様の傾向が確認された。

B6 では、相対変位に着目すると添接板(下)-母材、および母材-フィラープレート間における外側ボルト列付近の接触面で大きな部分すべりが生じている。接触状況に着目すると母材-フィラープレート間のみならず各々の接触面で内側ボルト鋼周辺に固着領域が確認され、主すべりが発生していないことが分かる。応力分布同様、母材降伏先行型継手の特徴がよく現れている。A6, C6 でも同様の傾向が確認された。

B4 では、添接板(下)-母材、およびフィラープレート-添接板(上)間で大きく相対変位し、この間で主すべりは発生しているものの、添接板(下)-母材および母材-フィラープレート間の外側ボルト列付近の接触面において大きな部分すべりが生じており、母材の外側ボルト孔周辺における塑性化の影響も伺える。以上のような現象から判断すると、B4 は B2 および B6 の中間的なモデルであると考えられる。A シリーズの A4 でも、同様の傾向が確認

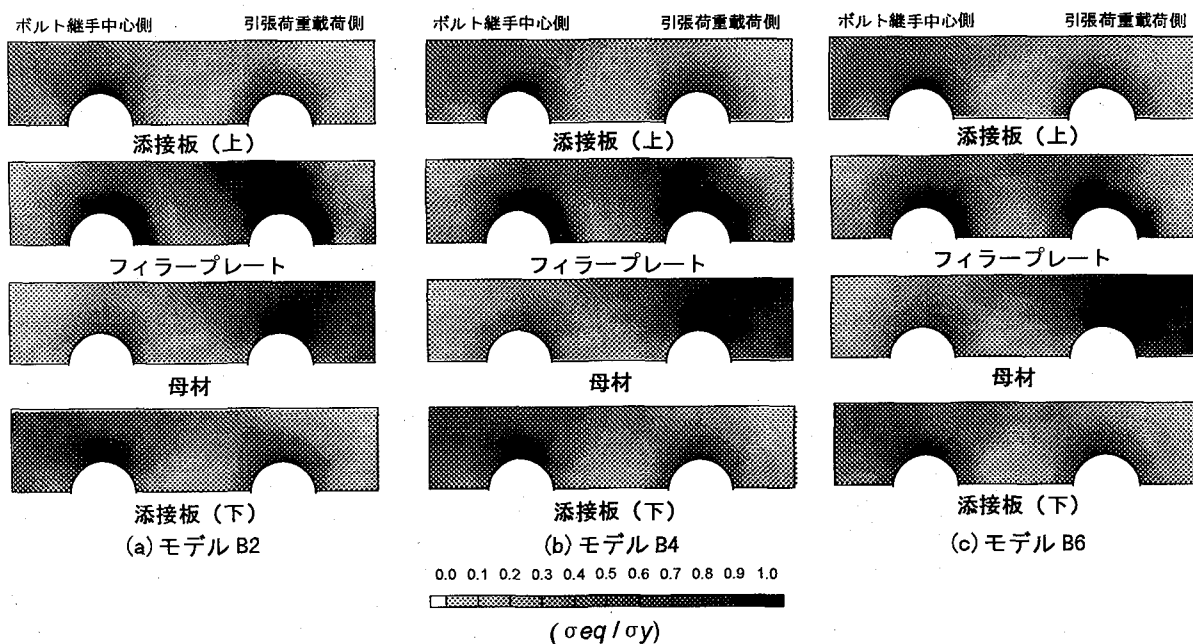


図-9 相当応力の分布

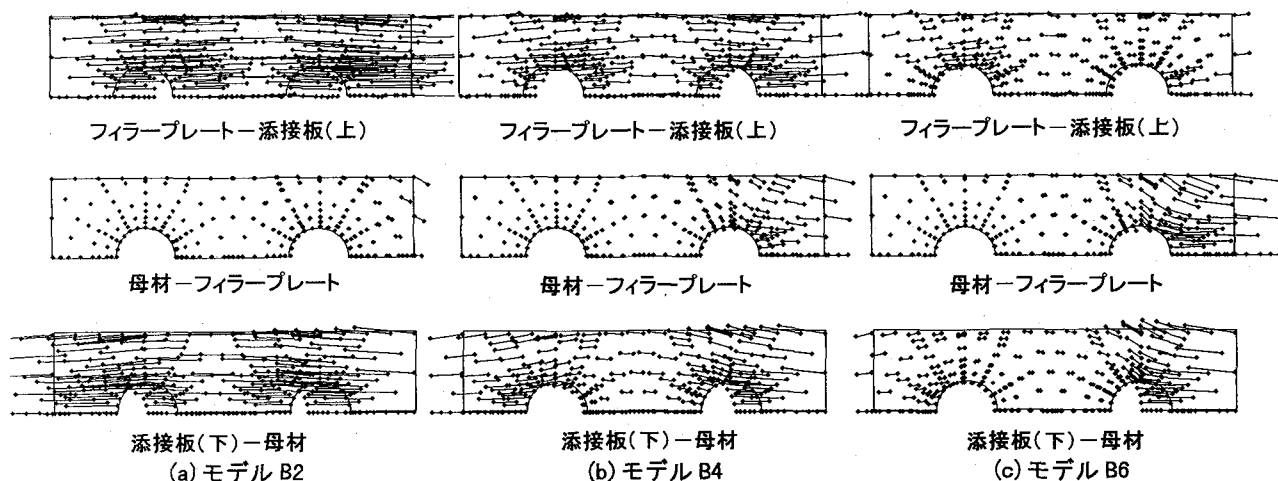
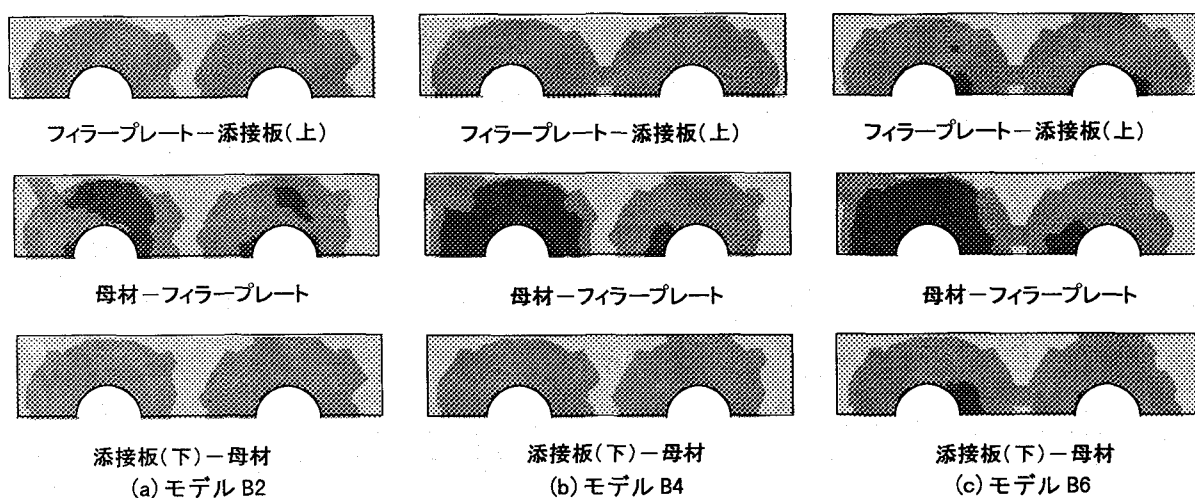


図-10 接触面における相対変位 (×100)



■ : 固着状態 ■ : すべり状態 □ : 剥離状態

図-11 接触面の接触状態

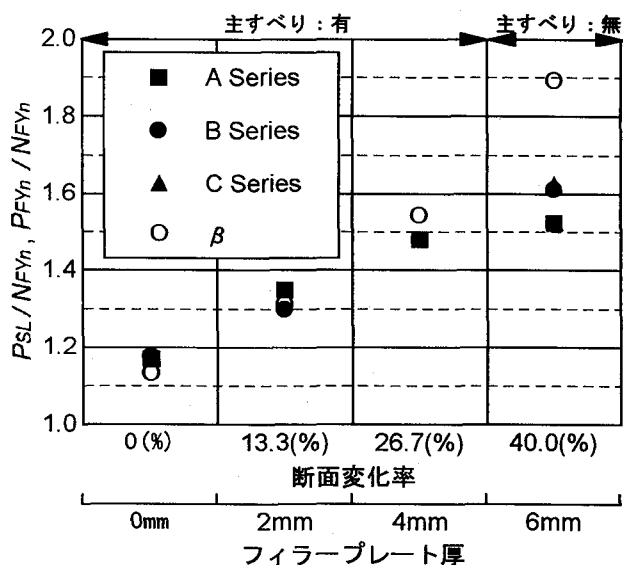


図-11 強度限界

された。

図-11 では、各モデルに対する強度限界 P_{SL} , P_{FYn} を評価した。図の縦軸は強度限界を N_{FYn} で無次元化した値、横軸は断面変化率およびフィラープレートの板厚である。

フィラープレートの材質に関わらず、A シリーズ、B シリーズ共に断面変化率が大きくなるに従い、強度限界は母材純断面降伏強度 N_{FYn} に対し余裕のある値となる。また、 $\beta (=N_{SL}/N_{FYn})$ との比較から明らかとなり、強度限界は断面変化率 26.7% 付近を境にすべり強度 N_{SL} を下回る傾向にある。断面変化率が 40% と大きいフィラープレートが 6mm のモデルでは、さらにその傾向は強まりフィラープレートの材質に関わらず、いずれも N_{SL} に対して 1 割以上低下した値となる。 β , γ に標準的な値を用いた本解析の範囲では、断面変化率 26.7% 付近に主すべり発生型の継手と母材降伏先行型の継手の境界が存在するといえる。

各モデルの強度限界よりすべり係数を算出すると、主すべり発生型の継手 A2, A4, B2, B4 では、フィラープレートの材質および板厚に関わらず、すべり係数は道路橋示方書⁵⁾の規準値である 0.4 をほぼ確保していた。6mm シリーズの A6, B6, C6 ではすべり係数は 0.4 を 1 割以上下回る値となるが、これらは母材降伏先行型の継手であるため、母材が全断面塑性化に達する以前に主すべりは発生しない。

4. 結論

高力ボルト摩擦接合継手の軸力伝達機構に与える低材質フィラープレートの影響を、フィラープレートの板厚および材質に着目し、2 行 1 列のボルト継手を対象として、弾塑性有限要素解析プログラムを用いてパラメトリックに解析した。その結果、得られた知見は以下の通りである。

- 1) フィラープレートが母材および添接板に比べ低材質の A シリーズおよび B シリーズのモデルでは、初期ボルト

ト軸力の導入に伴い、フィラープレートには局部的に降伏応力の 8 割以上の応力が生じるものの、降伏に達することはなく、継手の初期剛性への影響は少ない。一方、フィラープレートが母材および添接板と同材質の C6 では降伏応力の 5 割にも達しない。

- 2) β 値, γ 値およびフィラープレートの板厚, 材質によりボルト軸力の低下傾向は異なるものの、各モデルの強度限 (P_{SL} または P_{FYn}) におけるボルト軸力の低下は 10.0% 以内であり、著しい低下は生じていない。
- 3) 断面変化率が 13.3% の A2, B2 および 26.7% の A4, B4 では母材が全断面降伏に至る前に主すべりが発生した。一方 A6, B6, C6 のように断面変化率が 40% と大きい場合は、フィラープレートの材質に関わらず、母材降伏先行型の典型的な継手となる。そのため、主すべり発生以前に母材は全断面降伏に達し、母材の降伏荷重 P_{FYn} はすべり強度 N_{SL} に対し下回る値となる。断面変化率 26.7% のモデルが、上記 2 ケースの境界と考えられる。
- 4) 主すべり発生型の継手 A2, A4, B2, B4 に対してはフィラープレートは材質および板厚に関わらず、すべり係数は道路橋示方書⁵⁾の規準値である 0.4 をほぼ確保していた。
- 5) 主すべり発生型の継手 A2, A4, B2, B4 の主すべり発生時における鋼板の接触状況は、全モデルで母材-フィラープレート間で固着領域が確認され、主すべりは、添接板(上)-フィラープレートおよびフィラープレート-添接板(下)間で発生した。
- 6) 母材降伏先行型の継手 A6, B6, C6 では、フィラープレートの材質, 板厚に関わらず、母材の外側ボルト孔周辺における全断面塑性化により強度は決まる。また、B6, C6 に対して初期剛性, 強度限界を比較するとほぼ等しい値を呈しており、フィラープレート厚 6mm のモデルでは低材質のフィラープレートの使用が十分可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 建設省：鋼橋設計ガイドライン（案），1995. 10.
- 2) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，技報堂，1966.
- 3) Nishimura, N. Kamei, Y. and Ikehata, B. : Analysis of HSFG Bolted Joints Considering Local Slip, TECHNOLOGY REPORTS OF THE OSAKA UNIVERSITY, Vol. 46, No. 2257 pp. 227-236, 1996. 10.
- 4) 池端文哉・亀井義典・西村宣男：第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-A397, pp. 794-795
- 5) 秋山寿行：高力ボルト摩擦接合継手の限界状態に関する研究，大阪大学学位論文，1996. 1.
- 6) (社) 日本道路協会：道路橋示方書鋼橋編・同解説，1994. 2.
- 7) 秋山寿行・西村宣男・亀井義典・池端文哉：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分，鋼構造年次論文報告集, Vol. 3, pp. 289-296, 1995. 11. 亀井・池端・西村：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分に関する解析的研究，土木学会論文集（投稿中）
- 8) 亀井義典・池端文哉・西村宣男：高力ボルト摩擦接合継手の限界状態区分に関する解析的研究，土木学会論文集（投稿中）

(1996 年 9 月 6 日受付)